

DOI: 10.20103/j.stxb.202405151108

王硕,徐艺诺,翁大维,张煌帆,温晓娟,胡喜生,张兰怡.中国道路交通碳排放驱动因素及碳达峰.生态学报,2025,45(3):1315-1327.

Wang S, Xu Y N, Weng D W, Zhang H F, Wen X J, Hu X S, Zhang L Y. Driving factors and peak analysis of road traffic carbon emissions in China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1315-1327.

中国道路交通碳排放驱动因素及碳达峰

王 硕,徐艺诺,翁大维,张煌帆,温晓娟,胡喜生,张兰怡*

福建农林大学 交通与土木工程学院,福州 350108

摘要:随着道路交通碳排放量的不断攀升,全球温室效应不断加剧。近年来,在工业、能源等领域,结合因素分解模型与碳排放预测模型的双模型方法已显示出其在揭示碳排放关键驱动因素和探明碳达峰路径方面的优势,但在道路交通领域的应用尚显不足。利用多尺度排放清单模型获取 2001 年至 2019 年中国道路交通碳排放数据,并采用 GDIM 方法对影响碳排放的驱动因素(包括 GDP、道路交通能源消耗量、单位能耗碳排放量、人口总量、道路交通人均碳排放量、人均 GDP、单位 GDP 能耗和道路交通碳排放强度)进行分解。其次,设计五种逐层递进的情景,以评估不同政策组合下的减排潜力;最后,运用 LEAP 模型对 2021—2035 年中国道路交通的碳达峰情况进行情景仿真和预测。结果显示:(1)在各驱动因素中,GDP 是影响交通碳排放的最主要因素,而人均 GDP 是抑制碳排放的关键;(2)在各情景模拟中,中经济发展强效低碳情景(SLSC)和中经济发展强化低碳情景(ELSC)展现出最佳的减排效果,预计在 2024 年均能实现碳达峰,其峰值碳排放量分别为 1399.9Mt 和 1402.69Mt;在所有车型中,商用车碳排放将于 2020 年的 744Mt 增长至 2035 年的约 800—1300Mt,相较于其他车型,其碳减排潜力巨大;(3)尽管摩托车的碳排放量在三种车型中最低,但其排放量呈上升趋势。摩托车在单独实行“摩改电”措施后无法实现碳达峰,需要未来进一步的管控措施配合其他政策同步实施才能实现碳达峰。本研究所提出的模型及方法在交通运输碳减排中具有较好的参考价值。

关键词:道路交通;情景分析;碳达峰;驱动因素分解;长期能源替代规划系统(LEAP)模型

Driving factors and peak analysis of road traffic carbon emissions in China

WANG Shuo, XU Yinuo, WENG Dawei, ZHANG Huangfan, WEN Xiaojuan, HU Xisheng, ZHANG Lanyi*

College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China

Abstract: With the continuous rise of carbon emissions from road traffic, the global greenhouse effect is constantly intensifying. In recent years, the dual model approach of factor decomposition models and carbon emission prediction models, combined in industrial and energy fields, has shown its advantages in revealing the key driving factors of carbon emissions and uncovering the path to carbon peak, but its application in the field of road traffic is still insufficient. A multi-scale emission inventory model is used to obtain road traffic carbon emissions data from 2001 to 2019 in China and the GDIM method is used to decompose the driving factors that affect carbon emissions (including GDP, road traffic energy consumption, unit energy carbon emissions, population total, road traffic per capita carbon emissions, per capita GDP, unit GDP energy consumption, and road traffic carbon emission intensity). Secondly, five-layered scenarios are designed to evaluate the emission reduction potential under different policy combinations; finally, the LEAP model is employed to simulate and predict the carbon peak situation of road traffic in China from 2021 to 2035. The results show that: (1)

基金项目:福建省自然科学基金项目(2023J01475);福建省社科规划项目(FJ2022B065);国家级大学生创新创业训练计划项目(202410389030)

收稿日期:2024-05-15; **网络出版日期:**2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhang_lanyi@126.com

#限于数据的可获取性,本研究尚未含中国港澳台统计数据。

Among the driving factors, GDP was the most important factor affecting traffic carbon emissions, while per capita GDP was the key factor in curbing carbon emissions; (2) In the simulation of each scenario, the strong effective low-carbon scenario of China's economic development (SLSC) and the enhanced low-carbon scenario of China's economic development (ELSC) showed the best emission reduction effect, and are expected to achieve carbon peak in 2024, with peak carbon emissions of 1399.9 Mt and 1402.69 Mt respectively. Among all vehicle types, the carbon emissions of commercial vehicles are expected to experience growth from 744 Mt in 2020 to about 800—1300 Mt in 2035, with huge carbon reduction potential compared to other vehicle types; (3) Although the carbon emissions of motorcycles were the lowest among the three vehicle types, they are experiencing an upward trajectory. Motorcycles could not achieve a carbon peak by implementing "motorcycle-to-electric" measures alone, and further regulatory measures need to be implemented in conjunction with other policies to achieve a carbon peak. The comprehensive approach adopted in this research, integrating empirical data with advanced modeling techniques and scenario analysis, contributes to the body of knowledge on carbon emissions in the transportation sector. It offers an analytical framework that can be adapted to other regions and contexts, providing a valuable tool for policymakers and researchers worldwide in their efforts to address the global challenge of climate change.

Key Words: road traffic; scenario analysis; carbon peaks; driving factor decomposition; LEAP model

交通运输行业是中国第三大人为二氧化碳(CO₂)排放来源,超过80%的CO₂排放来自道路机动车^[1-2]。尽管我国实施了一系列措施以降低碳排放,包括控制机动车增长率、推广新能源汽车和提高燃油经济性等,然而,长期来看,道路交通的碳排放仍受到多种因素的影响,因此需要全面了解推动这些排放的驱动因素。这将有助于更好地揭示道路交通碳减排的路径^[3-4]。

关于交通碳排放问题的研究,国内外学者给予了高度关注,围绕碳排放驱动因素及实现“双碳”目标的可能性展开了广泛讨论^[5-6]。首先,当前学者们在探讨交通碳排放驱动因素方面,主要应用增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)模型^[3-4]、对数平均迪氏指数法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)^[3, 7]以及可拓展的随机性环境影响评估模型(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology, STIRPAT)^[8]等方法,对影响道路交通碳排放的因素(如经济发展水平、人口规模、能源强度、能源结构、交通量和交通行为等)进行分解,以揭示其经济、社会和能源等多方面的相关性^[9]。然而,IDA方法在驱动因素选择上相对主观,可能无法准确反映实际情况^[10]。其次,在基于碳排放驱动因素分解的基础上,部分学者进一步探究碳达峰趋势时,采用了将驱动因素分解模型与预测模型相结合的方法^[9, 11]。例如,一些研究利用长短期记忆神经网络模型,基于驱动因素预测碳达峰的时间节点^[12]。此外,还有研究将长期能源替代规划系统(Long Range Energy Alternatives Planning System, LEAP)与STIRPAT模型相结合,应用于特定地区的数据分析,以探索实现碳达峰的路径^[13]。尽管这些方法在预测碳达峰方面显示了良好潜力,但现有研究往往未能充分考虑两个模型之间的相互作用和融合。再次,目前关于道路交通碳排放的研究主要集中在汽车排放,而摩托车的碳排放问题尚未得到充分关注。摩托车在我国机动车保有量中占约20%^[14],然而,当前摩托车的排放标准为2016年实施的国IV标准,相较于汽车排放标准的更新频率,显得相对滞后^[15]。最后,在设置交通碳排放情景时,研究者通常采用不同情景组合来预测碳排放的达峰情景,但对情景组合的协同效应关注较少,内在联系与相互作用的探讨也不够深入。

为应对上述挑战,本研究将从以下几个方面进行改进:(1)在驱动因素分解方法的选择上,广义对数迪氏分解法(Generalized Divisia Index Method, GDIM)能够全面分析中国道路交通碳排放的驱动因素,并消除IDA模型带来的主观影响^[10],从而打破不同影响因素在形式上的相互依赖性,适用于道路交通碳排放驱动因素的分解。(2)结合驱动因素分解模型与碳排放预测模型,首先通过GDIM模型揭示道路交通碳排放的主要驱动因素;其次,基于不同经济发展条件构建道路交通减排情景,包括高经济发展和中经济发展水平,分别代表中国高速发展时期的延续及转型经济体系下的预计发展速度^[16];最后,通过将驱动因素分解模型与LEAP预测

模型相结合,探讨在不同经济发展条件下道路交通碳排放达到峰值的情景。(3)针对道路交通碳排放模型,考虑将乘用车、商用车和摩托车作为研究对象,其中乘用车包括除出租车外的所有小型载客汽车,而商用车则涵盖中、大型载客汽车、出租车及各类载货汽车^[2, 17]。(4)应用逐层递进的减排情景,增加情景之间的内在关联性,当某一情景未能在规定年份实现碳达峰时,进一步叠加其他情景以探讨其达峰情况。

1 材料与方

1.1 驱动因素分解模型

根据 Vaninsky^[10]所提出的 GDIM 模型,本研究将 GDP(G)、道路交通碳排放强度(C/G)、道路交通能源消耗量(E)、单位能耗碳排放量(C/E)、人口总量(P)、道路交通人均碳排放(C/P)、人均 GDP(G/P) 和单位 GDP 能耗(E/G)作为道路交通碳排放(C)的驱动因素,表达式见式(1)–(3):

$$C = G \times (C/G) = E \times (C/E) = P \times (C/P) \quad (1)$$

$$E/G = (C/G)/(C/E) \quad (2)$$

$$G/P = (C/P)/(C/G) \quad (3)$$

对上述三个公式进行分解可得式(4)–(8):

$$Z = X_1 X_2 = X_3 X_4 = X_5 X_6 \quad (4)$$

$$X_7 = X_1/X_5 \quad (5)$$

$$X_8 = X_3/X_1 \quad (6)$$

$$X_1 X_2 - X_3 X_4 = X_1 X_2 - X_5 X_6 = 0 \quad (7)$$

$$X_1 - X_5 X_7 = X_3 - X_1 X_8 = 0 \quad (8)$$

式中, Z 代表道路交通碳排放量, 10^3 t; X_1 为国内生产总值, 10 亿元; X_2 表示道路交通碳排放强度, 10^3 t/10亿元; X_3 表示道路交通能源消耗量, 10^4 t标准煤; X_4 为单位能耗碳排放量, 10^3 t/10⁴t标准煤; X_5 表示人口总量,百万人; X_6 为人均碳排放量, 10^3 t/百万人; X_7 为人均 GDP, 10 亿元/百万人; X_8 为单位 GDP 能耗, 10^4 t标准煤/10亿元。

其余计算过程如雅可比矩阵和变化量计算等已在本团队前期研究中详细罗列^[18]。

1.2 情景设置

本研究参考文献^[19–23]设置5种经济发展情况与不同气候变化的叠加情景。将基准年设置为2020年,预测时间跨度为2021—2035年。其中,经济发展趋势参考中国社会科学院的相关数据^[22],情景设置相关数据见表1。

1.3 LEAP 模型

1.3.1 道路交通能源消耗以及碳排放量测算

(1) 能源消耗计算

道路机动车的能源消耗量的计算具体如式(9):

$$EC_{ij} = P_{ij} \times VKT_i \times FC_{ij} \quad (9)$$

式中, EC_{ij} 为*i*类机动车*j*类燃料的能源消耗量(标准煤),Mt; P_{ij} 为*j*类燃料*i*类机动车的保有量,辆; VKT_i 为*i*类机动车的年平均行驶里程,km; FC_{ij} 为*j*类燃料*i*类机动车的能源消耗量,L(kW·h)/km。

(2) CO₂排放计算

道路机动车 CO₂排放量的计算具体如式(10):

$$CE = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m EC_{ij} \times EF_j \quad (10)$$

式中, CE 为道路交通机动车 CO₂排放量,Mt; n 为机动车类别; m 为燃料类别; EC_{ij} 为*j*类燃料*i*类机动车的能源消耗量(标准煤),Mt; EF_j 为*j*类燃料的 CO₂排放因子,kg/Mt。

表 1 情景设置

Table 1 Scenario settings

情景 Scene	变量控制 Variable control	数据来源 Data source
高经济增长条件下无控制气候变化场景 General low-carbon scenarios without controlling economic development, GLS	延续 2020 年的政策和“十三五”期间的经济发展趋势, 以实现 2021—2035 年的“十四五”及“十五五”计划目标为导向, 在 2035 年底前电动汽车占有率达到 40%。同时, 通过控制乘用车油耗, 在 2025、2030 和 2035 年分别将其降低至 4.0、3.2 和 2L/100km, 并在 2025 年将电动车电耗降低至 12kW·h/100km。推行摩托车“油改电”政策, 在 2030 年和 2035 年分别达到 60% 和 70% 的市场占有率。	[19, 23—24]
高经济增长条件下低控制气候变化场景 Enhanced low-carbon scenario without controlling economic development, ELS	经济发展继续沿用基准年政策, 并加强出行控制措施。从 2021 年开始, 除公共交通工具外, 所有车型的年均行驶里程将降低 1%。同时, 在 2025 年提升公共交通在机动化出行中所占比例达到 35%。	[23—24]
中经济增长条件下低控制气候变化场景 General low-carbon scenarios for controlling economic development, GLSC	经济发展速度放缓, 转向高质量发展的经济社会, 积极推动新能源汽车普及。计划在 2030 年和 2035 年分别实现市场电动汽车保有率达到 40% 和 50%, 并于 2025 年实现新能源公共交通工具 100% 保有率。同时改善发电结构, 提高清洁能源比例, 到 2035 年将电力碳排放因子从 2021 年的 0.5704 降低至 0.4086。	[19—20, 22, 25]
中经济增长条件下中控制气候变化场景 Enhanced low-carbon scenarios for controlling economic development, ELSC	进一步采取措施限制非公共交通商用车辆的行驶, 在部分试点市区范围内禁止其行驶, 并且限制货车出行次数, 全面淘汰国 III 以下排放标准的汽车, 重型柴油车全面更新替代。	[23]
中经济增长条件下高控制气候变化场景 Strong low-carbon scenarios for controlling economic development, SLSC	在 ELSC 的基础上优化货运方式, 进一步推广清洁能源货运车辆, 在 2021—2035 年逐渐提高小微型电动货车的占比, 并于 2035 年达到 30%。	[26]

1.3.2 机动车保有量预测

(1) 乘用车保有量

为使其预测数据精确度更高, 本文采用冈珀茨曲线 (Gompertz) 模型将 GDP 与人口和机动车保有量相结合^[19]。具体如式(11):

$$V_p = Ka^{bg} \times p \quad (11)$$

式中, V_p 为乘用车保有量, 辆; g 为人均 GDP, 万元/人; K 为乘用车保有率的饱和值, 辆/千人; a, b 为模型回归参数, 其中 $0 < a < 1, 0 < b < 1$; p 为人口数量, 人。

(2) 商用车保有量

根据中国社会科学院预测我国人均 GDP 将长期保持在一个中低水平阶段, 在此阶段中, 商用车保有量与人均 GDP 近似线性相关^[2, 17, 22], 其预测公式如式(12):

$$V_c = (m \times g + n) \times p \quad (12)$$

式中, V_c 为商用车保有量, 辆; g 为人均 GDP, 万元/人; m 为模型回归参数, 其中 $m > 0$ 。

(3) 摩托车保有量

根据公安部近 5 年的摩托车保有量数据可知摩托车保有量呈指数上升趋势, 采取指数平滑法进行预测, 具体公式如式(13):

$$S_t = a \times y_t + (1 - a)S_{t-1} \quad (13)$$

式中, S_t 为时间 t 的摩托车保有量, 辆; y_t 为时间 t 的实际值; S_{t-1} 为时间 $t-1$ 的平滑值; a 为平滑常数。

1.3.3 机动车保有量预测情况

为了确保预测结果具有可靠性和有效性, 将预测数据与实际数据和已有研究之间进行比对, 数据误差百分比小于 8%, 符合误差精度。具体对比结果见表 2。

表 2 本研究机动车保有量与其他研究结果对比

Table 2 Comparison of motor vehicle ownership in this study with results from other studies

参考文献 References	年份 Year	机动车保有量 Number of motor vehicles	与其他研究结果对比误差 Comparison error with other studies
[14]	2020	3.72 亿	3.89%
	2021	3.95 亿	3.94%
	2022	4.35 亿	4.40%
	2023	4.35 亿	5.12%
[17]	2030	乘用车 4.23 亿,商用车 0.47 亿	乘用车:1.6%,商用车:0%
	2030	高增长情景下:乘用车 4.23 亿,商用车 0.53 亿	乘用车:0.7%,商用车:3.92%
[2]	2030	低增长情景下:乘用车 3.82 亿,商用车 0.49 亿	乘用车:7.7%,商用车:4.26%

1.4 数据来源

交通碳排放数据来源于清华大学开发的基于云计算平台开发的中国多尺度排放清单模型数据库和相关文献^[27-29]。GDP、道路交通能源消耗与人口来源于《中国统计年鉴》。各车型的年平均行驶里程来自《道路机动车排放清单编制技术指南》^[30]及相关文件^[25]。各车型数据来源于《2022 年交通运输行业发展统计公报》^[26]、《中国交通统计年鉴 2001—2019》以及《中国统计年鉴 2001—2019》。乘用车保有量预测 Gompertz 模型中 GDP 原始参数来自《中国交通统计年鉴》。不同车型不同燃料的能源消耗量来自文献^[24]与本团队前期研究^[23]。为了避免 COVID-19 对中国道路交通碳排放的影响,预测时间段选用 2001—2019 年。

2 结果与分析

2.1 驱动因素分解结果

GDIM 各因素与道路交通碳排放的皮尔森相关系数如图 1 所示。分析结果表明,碳排放与多个因素存在显著或极显著的相关关系。其中,与 C 最高的是 C/P 和 G,分别达到了 0.995 和 -0.702;与 G 的相关性最弱,

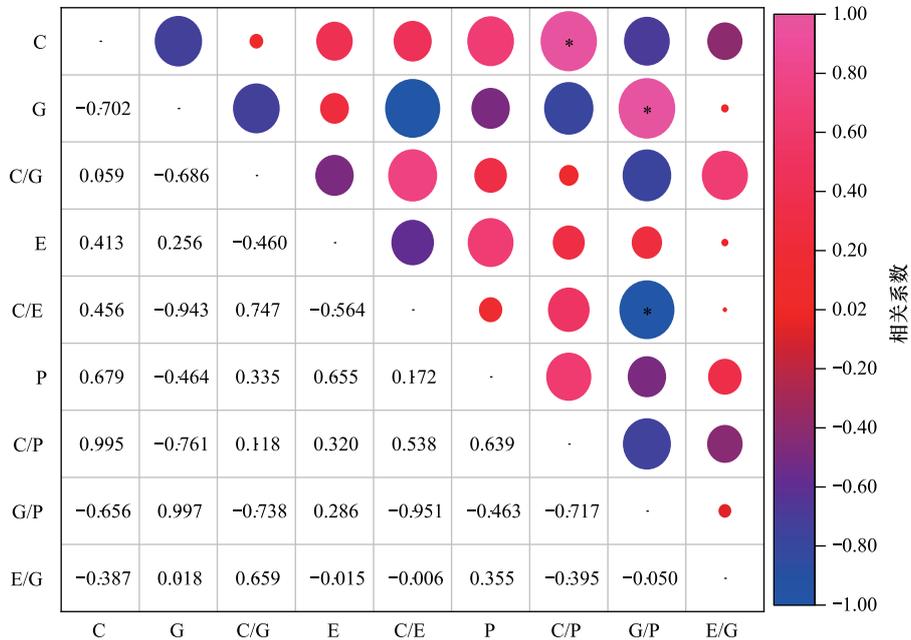


图 1 道路交通碳排放与各驱动因素相关性

Fig.1 Correlation between transportation carbon emissions and driving factors

C:道路交通碳排放量;G:GDP;C/G:道路交通碳排放强度;E:道路交通能源消耗量;C/E:单位能耗碳排放量;P:人口总量;C/P:人均碳排放量;G/P:人均 GDP;E/G:单位 GDP 能耗

相关系数仅为 0.059。从整体来看,除了 C/G 之外,其他所有因素均展示出一定的相关性,说明 GDIM 模型在分析道路交通碳排放方面具有较强的适用性,其设定的驱动因素是合理的。

为了降低研究中年度个例的影响,我们将时间段设置为每五年为一个阶段,分别对应中国的“十五”规划至“十三五”规划的实施年份。通过这一分析,我们得到了道路交通碳排放及其驱动因素的变化趋势,如图 2 所示。结果表明,尽管道路交通的碳排放量在每五年内均呈现上升趋势,但其增速却逐年减缓,平均年增长率约为 5.26%。与此同时,与碳排放变化趋势相同的驱动因素包括人均碳排放量,而与之变化趋势相反的因素则包括 GDP 和人均 GDP,其余驱动因素的变化则呈现波动特征。

各驱动因素的碳排放贡献量和碳排放贡献率变化分别见图 3 与图 4,在所划分的 4 个阶段中,GDP、人均 GDP、道路交通能源消耗量、道路交通人均碳排放量和人口数量对道路交通碳排放起到正向驱动作用;其余因素对道路交通碳排放起到负向驱动作用。

在道路交通碳排放的正向驱动因素中,GDP 增长对道路交通碳排放总计贡献了 $369361.6 \times 10^3 \text{t}$,贡献率高达 65.91%。经济发展不仅促进了城市化进程,还推动了汽车产业的蓬勃发展。然而,伴随着城市化率及机动车保有量的快速增长,碳排放也随之显著上升。人均 GDP 亦具有显著的碳排放贡献,其总计贡献量为 $349069.3 \times 10^3 \text{t}$,贡献率约为 62.30%。由于我国当前人口基数庞大,人口总量变化幅度相对较小,因此人均 GDP 所引发的碳排放量与 GDP 增长量之间呈现出相应的比例增长关系。同时,道路交通能源消耗的增长亦对碳排放产生了重要影响,总计贡献了 $246616 \times 10^3 \text{t}$,贡献率为 44.01%。中国的道路交通正处于快速发展阶段,其能源消耗量随着客运与货运周转量的显著增加而迅速上升。预计在未来几年及几十年内,道路交通能源消耗将成为道路交通碳排放的主要驱动因素之一。此外,道路交通人均碳排放量的增长也显著,累计贡献了 $234352.1 \times 10^3 \text{t}$,贡献率达到 41.82%。在近年来我国政府长期倡导的节能减排方针的背景下,公众愈发意识到气候变化和空气污染对环境的影响,从而使得人均碳排放量的增速逐年减缓。最后,人口数量因素在道路交通碳排放中的变化幅度最小,其总计贡献为 $12505.95 \times 10^3 \text{t}$,贡献率仅为 2.23%。由于我国人口基数庞大,且人口增长率相对较低,因此人口总量的瞬时变化在交通碳排放中并未迅速显现。综上所述,各种因素在道路交通碳排放中的作用各有不同,显著的影响来源于经济增长、能源消耗及人均 GDP 的提升,而人口数量对碳排放的影响相对有限。

在道路交通碳排放的负向驱动因素中,道路交通碳排放强度的减排效果约为 $70779 \times 10^3 \text{t}$,减排贡献率达到 12.63%。这一成果得益于“十一五”规划的明确量化目标,该规划承诺到 2020 年碳排放强度降低 45%。其次,单位 GDP 的能耗实现了 $70170.4 \times 10^3 \text{t}$ 的减排,减排贡献率约为 12.52%。尽管如此,由于道路交通的能源消耗量、GDP 和道路交通碳排放均呈现同步上升的趋势,且其趋势相似,这导致单位 GDP 能耗与交通碳排放之间的相关性较弱,从而减排贡献率相对较低。最后,单位能耗的碳排放量减排效果持续增加,约为 $2304.32 \times 10^3 \text{t}$,减排贡献率约为 0.41%。这反映出中国能源利用效率逐渐提高,能源结构得到优化,同时,道路交通行业也在不断推动产业结构和能源结构的调整与改善。

综上,考虑到 GDP 和人均 GDP 是道路交通碳排放的两个主要来源,本研究将其作为情景设置的基础,应用于后续预测模型。同时,为了降低模型误差,贡献率与减排率最低的人口数量和单位 GDP 能耗被设置为不变。

2.2 LEAP 模型预测结果

乘用车、商用车和摩托车的碳排放,以及整体碳排放的预测值见图 5。在五种情景下中国道路交通的碳排放总量存在显著差异。其中,在 ELSC 和 SLSC 情景下,道路交通整体碳排放能够于 2024 年实现碳达峰。而在其他情景下,虽然都存在一定的减排效果,但无法实现碳达峰。

在考虑道路交通整体碳排放的情境下,根据不同情景的分析,GLS 情景无法实现碳达峰,主要原因在于经济发展所带来的商用车保有量迅速增长,导致碳排放增速过快。此时,乘用车的碳减排量未能抵消商用车碳排放的增长。此外,虽然 ELS 与 GLS 情景相同,同样无法实现碳达峰,但相较于 GLS,ELS 情景在碳减排效率

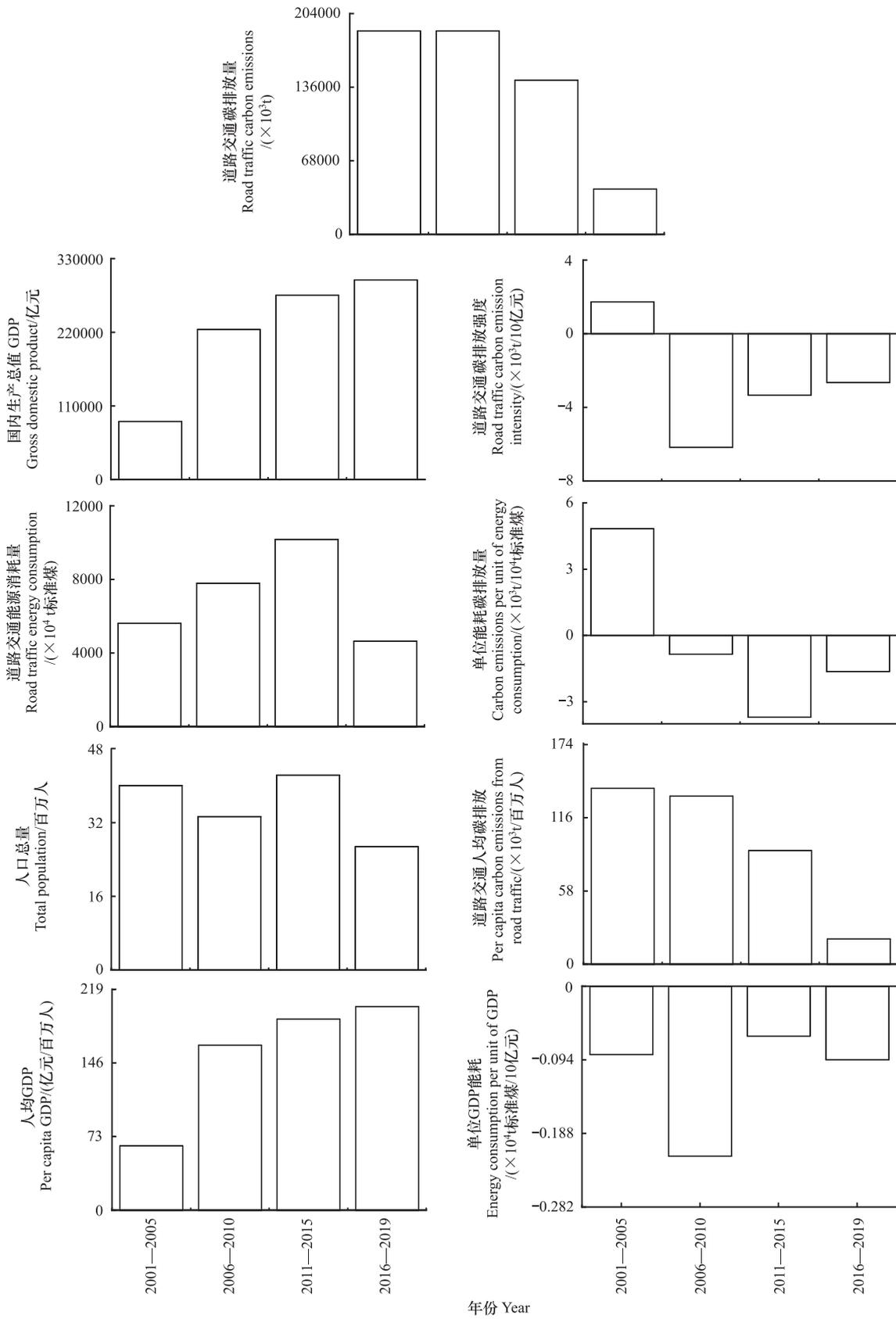


图 2 道路交通碳排放及其驱动因素变化趋势

Fig.2 Trends of transportation carbon emission and its driving factors

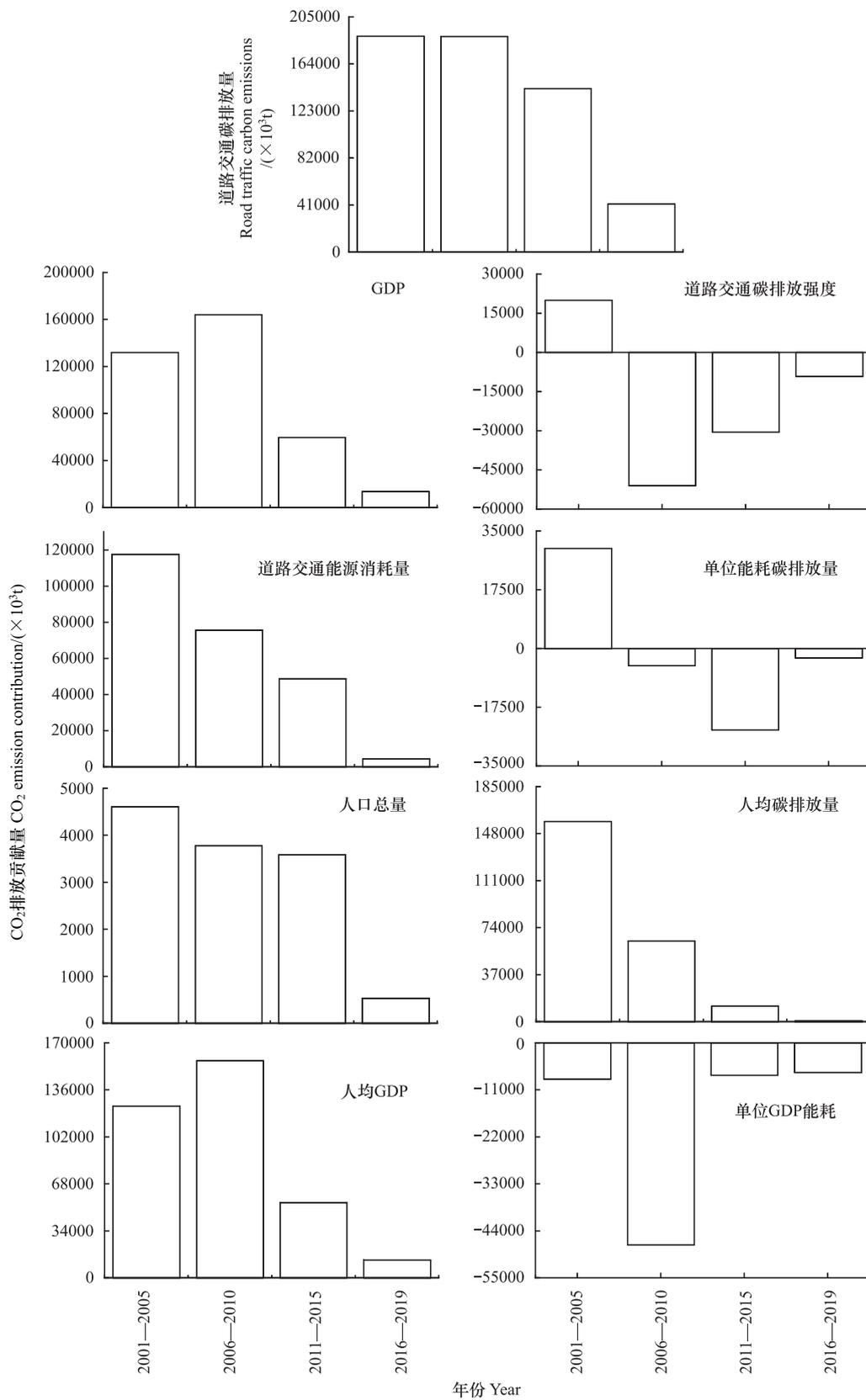


图3 道路交通碳排放与各驱动因素的贡献量变化

Fig.3 Transport carbon emissions and contribution changes of each driving factor

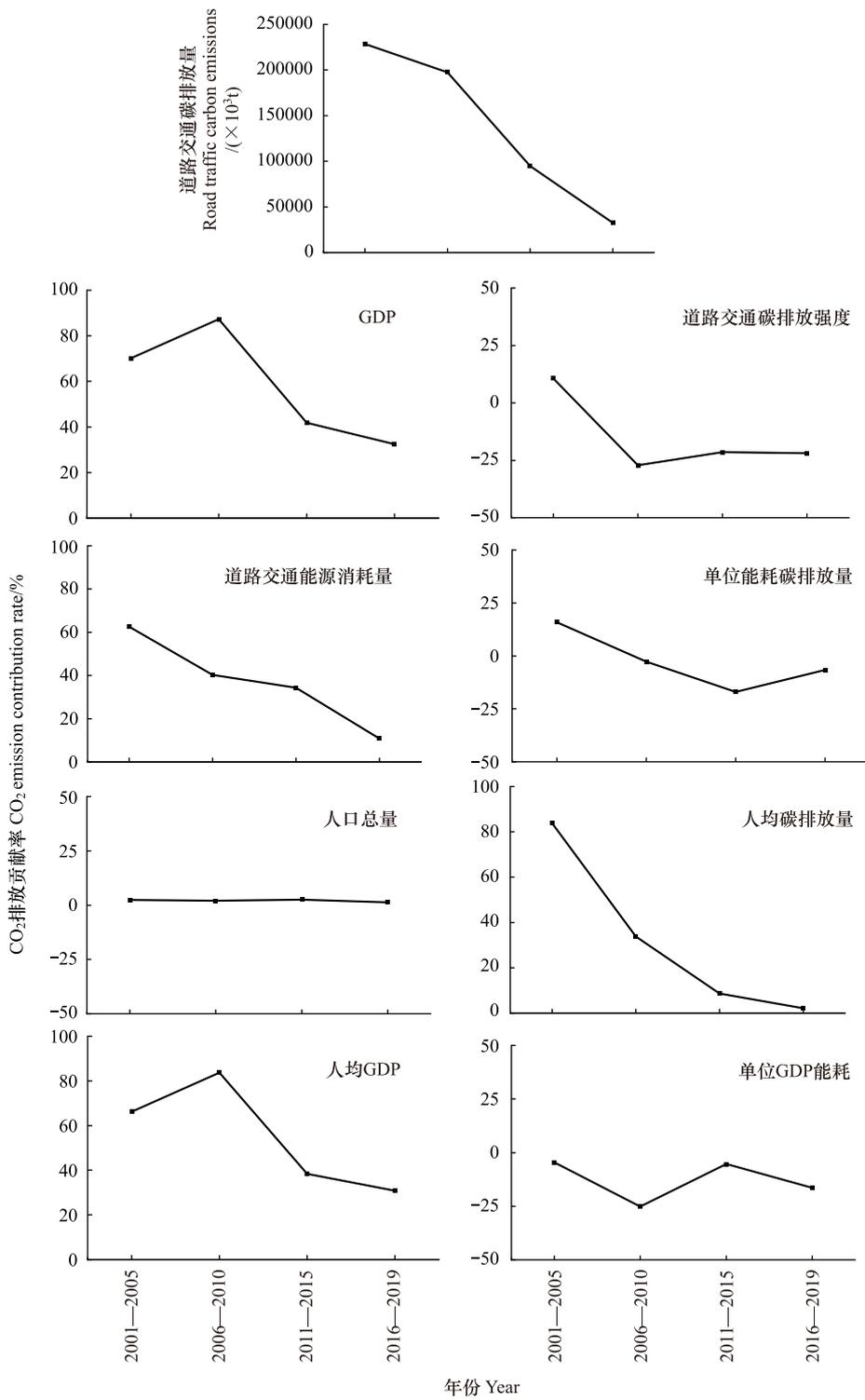


图 4 驱动因素贡献率

Fig.4 Contribution rate of driving factors

上表现出约 263.62Mt 的优势,降幅比率明显。在 GLSC 情景中,道路交通整体碳排放在超过 2026 年的峰值 1469.96Mt 后,虽在 2026 年至 2033 年期间呈现持续下降趋势,但在 2033 至 2035 年期间却出现反弹。这一变化的原因在于该情景下乘用车碳排放下降速度较快,一定时期内超过了商用车碳排放的增长速度,从而在短期内实现了碳达峰。然而,长期来看,碳排放水平仍将继续上升。在 ELSC 情景中,道路交通整体碳排放预计

在 2024 年达到峰值,峰值为 1402.69Mt。而在 SLSC 情景中,则预计在同一年达到峰值,约为 1399.90Mt,表现出达峰后减速放缓的趋势。尽管达峰后减速放缓,但要实现碳中和仍需较长时间的调整和努力。

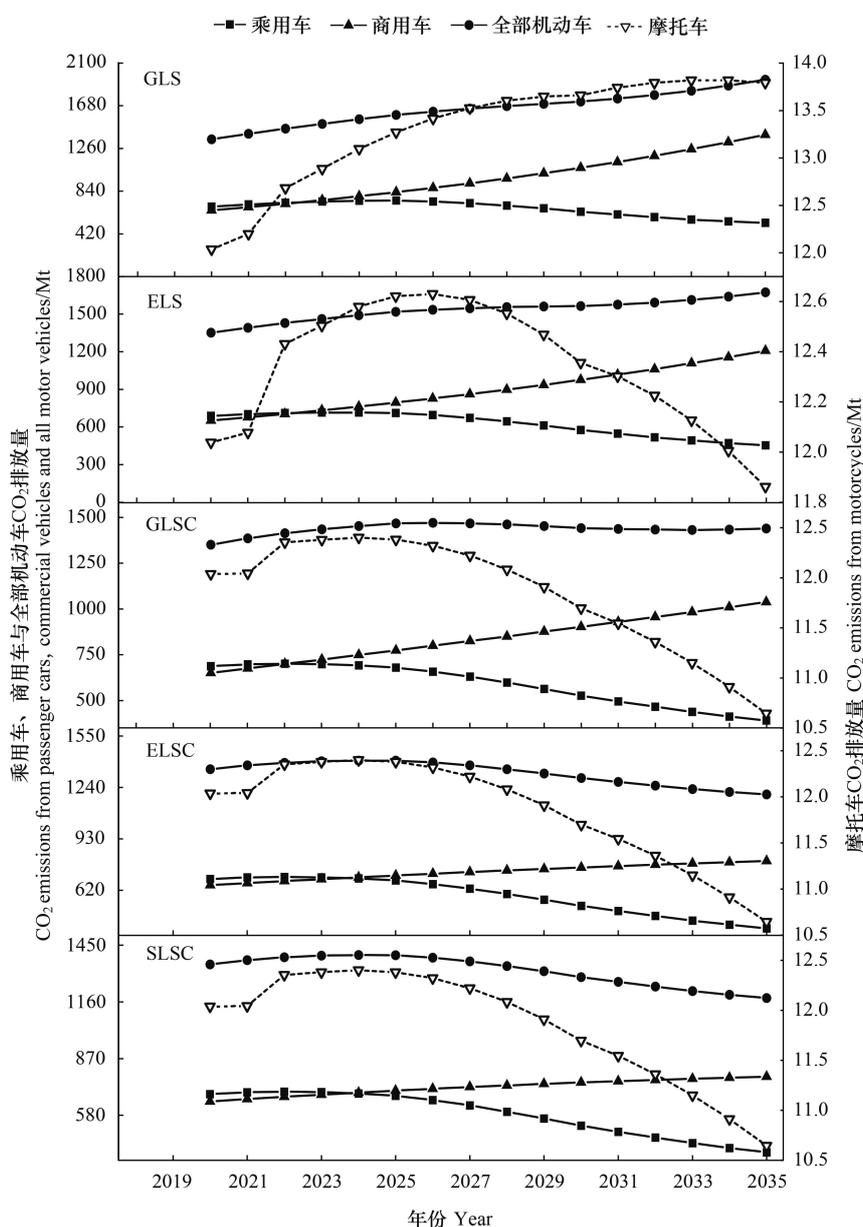


图 5 乘用车、商用车和摩托车的碳排放预测值

Fig.5 Projected carbon emissions for passenger cars, commercial vehicles and motorcycles

GLS:高经济增长条件下无控制气候变化场景;ELS:高经济增长条件下低控制气候变化场景;GLSC:中经济增长条件下低控制气候变化场景;ELSC:中经济增长条件下中控制气候变化场景;SLSC:中经济增长条件下高控制气候变化场景

针对商用车的不同情景分析表明,在 2030 年前无法实现碳达峰,并且预计在 2035 年其碳排放将达到最大值。相较于基准情景(GLS)强化情景中所实现的减排率分别为:ELS(13.46%)、GLSC(25.60%)、ELSC(2.76%)以及 SLSC(44.16%)。在 GLS 情景下,由于政策对商用车发展的管控不足,商用车在整体道路交通碳排放中的比例预计将从 2020 年的 48.03% 上升至 2035 年的 71.46%。而在 ELS 情景中,由于商用车的行驶里程远高于乘用车,控制其行驶里程将对碳排放产生显著影响,从而实现 13.46% 的减排率。在 GLSC 情景下,经济发展速度的控制对商用车保有量和排放量起到了关键作用,其碳排放量因此大幅降低,减排率达到

25.60%。通过进一步降低商用车的行驶里程,ELSC 情景下的减排效果更加显著,达到了 42.76%。在 SLSC 情景中,尽管增设电动货车能够进一步降低商用车的碳排放,但其效果较为有限,与 ELSC 情景相比,仅增加了 1.4%的减排率。对于摩托车而言,在 GLS 情景下,“摩改电”措施的减排效果并不显著,未能在 2030 年前实现碳达峰,预计其碳排放在 2030-2035 年间持续上升,并在 2035 年达到最大值 13.55 万 t。而在 ELS 情景中,推广公共交通对摩托车的减排成效明显,预计将使摩托车碳排放在 2026 年达到碳达峰,峰值为 12.35 万 t。在 GLSC 情景下,受益于电力部门能源结构的优化,摩托车的减排效果显著,碳达峰时间提前至 2024 年,峰值降至 12.12 万 t。

不同情景下各车型的预测排放量如图 6 所示。整体道路交通的排放预测呈现出明显的下降趋势,并且散点分布逐渐集中,显示出道路交通机动车的整体减排潜力巨大。乘用车的排放区间变化较小,峰值几乎没有显著改变。然而,随着电动汽车市场占有率的提高和燃油经济性的改善,预计在 2030 年前,乘用车碳排放将实现达峰。相比之下,商用车的排放区间变化显著。此外,在推行“摩改电”措施及优化电力部门能源结构后,摩托车的碳排放量出现了明显下降。

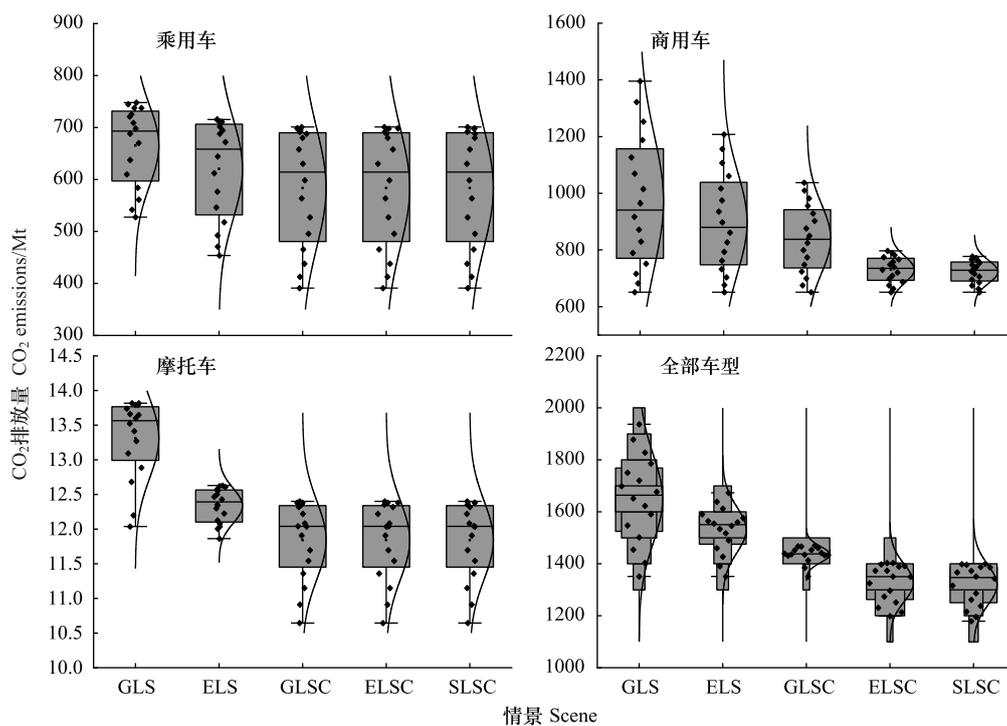


图 6 各车型的预测排放量区间分布

Fig.6 Emission distribution in the forecast range of each vehicle type

3 讨论

在中国的道路交通领域,GDP 和人均 GDP 是导致碳排放增加的主要驱动因素,而道路交通的碳排放强度与单位 GDP 能耗则是降低碳排放的关键因素。尽管在实施限制经济发展速度、推动电动汽车普及以及提升燃油效率等政策后,我国预计到 2024 年将实现道路交通碳排放达峰,然而商用车的碳排放仍占据该领域的重要部分。研究表明,商用车相比乘用车具有更大的减排潜力。然而,已有研究指出,在国 VI 标准实施过程中,货车的二氧化碳排放量可能会出现上升趋势,这将成为商用车在碳减排过程中面临的一项重大挑战^[31]。此外,虽然摩托车的碳排放总量较小,但其排放量却呈现逐年递增的趋势。摩托车在不同地区的保有量存在显著差异,然而,由于缺乏长期的区域性统计数据,目前尚未能够制定出更为准确的摩托车碳排放清单。

4 结论及政策建议

4.1 结论

(1) 在中国道路交通碳排放领域, GDP 和人均 GDP 显著地主导了碳排放量的增长。其中, GDP 增长对道路交通碳排放总计贡献了 $369361.6 \times 10^3 \text{t}$, 贡献率达 65.91%; 人均 GDP 总计贡献了 $349069.3 \times 10^3 \text{t}$, 贡献率约为 62.30%。

(2) 我国道路交通碳排放预计能够在 2024 年实现碳达峰, 峰值约为 1400Mt。商用车保有量在经济发展过程中受到影响较大, 经济发展所带来的道路交通碳排放主要是因为商用车保有量的快速增长导致。因此, 商用车存在较大的碳减排潜力。

(3) 摩托车碳排放约为道路交通碳排放的 5%—7%。其在基准年的碳排放为 11.75Mt, 在不加以控制的情景下 2035 年将达到 13.55Mt。在单独实施“摩改电”措施以后, 摩托车碳减排效果不显著, 需要结合其他政策同步实施才能实现碳达峰。

4.2 政策建议

(1) 针对 GDP 和人均 GDP 是导致道路交通碳排放增长的两个重要因素的研究结论, 未来需要加快推动形成绿色交通方式, 并推动经济发展的全面绿色转型。此外, 应当控制经济发展速度, 提升经济发展质量, 确保经济发展的科学性。

(2) 针对商用车存在较大碳减排潜力这一研究结论, 未来可通过实施商用车限号、限制商用车进入城市核心区或制定商用车出行策略等措施减少商用车碳排放。此外, 推动商用车制造企业提升车辆能效和推广电动商用车等技术创新措施, 有助于在道路交通减排方面发挥积极作用。

(3) 针对摩托车碳排放逐年增加的研究结论, 未来可通过加速在农村和乡镇地区推广摩托车电动化, 并且加速铺设电动摩托车充电设施, 以促进能源部门实现摩托车碳减排的转型。同时, 加快制定摩托车排放标准并鼓励能源技术升级, 也有助于实现摩托车碳达峰。

参考文献(References):

- [1] Zhang L Y, Weng D W, Xu Y N, Hong B Y, Wang S, Hu X S, Zhang Y Y, Wang Z Y. Spatio-temporal evolution characteristics of carbon emissions from road transportation in the mainland of China from 2006 to 2021. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170430.
- [2] 黄志辉, 纪亮, 尹洁, 吕晨, 王军方, 尹航, 丁焰, 蔡博峰, 严刚. 中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 385-393.
- [3] Huang Y M, Wang Y, Peng J T, Li F, Zhu L, Zhao H H, Shi R. Can China achieve its 2030 and 2060 CO₂ commitments? Scenario analysis based on the integration of LEAP model with LMDI decomposition. *Science of the Total Environment*, 2023, 888: 164151.
- [4] Li W K, Wen H X, Nie P Y. Prediction of China's industrial carbon peak: Based on GDIM-MC model and LSTM-NN model. *Energy Strategy Reviews*, 2023, 50: 101240.
- [5] 吕天宇, 曾晨. 交通网络空间互动视角下生态足迹驱动机制. *生态学报*, 2022, 42(4): 1340-1353.
- [6] 陈万旭, 卞娇娇, 钟明星, 曾杰, 梁加乐, 曾源源. 交通通达度对生态系统健康的影响——以长江中游城市群为例. *生态学报*, 2022, 42(14): 5721-5733.
- [7] Zhang W, Wang N. Decomposition of energy intensity in Chinese industries using an extended LMDI method of production element endowment. *Energy*, 2021, 221: 119846.
- [8] Li B, Liu X J, Li Z H. Using the STIRPAT model to explore the factors driving regional CO₂ emissions: a case of Tianjin, China. *Natural Hazards*, 2015, 76(3): 1667-1685.
- [9] Tan X C, Dong L L, Chen D X, Gu B H, Zeng Y. China's regional CO₂ emissions reduction potential: a study of Chongqing city. *Applied Energy*, 2016, 162: 1345-1354.
- [10] Vaninsky A. Factorial decomposition of CO₂ emissions: a generalized Divisia index approach. *Energy Economics*, 2014, 45: 389-400.
- [11] Chai J, Liang T, Lai K K, Zhang Z G, Wang S Y. The future natural gas consumption in China: Based on the LMDI-STIRPAT-PLSR framework and scenario analysis. *Energy Policy*, 2018, 119: 215-225.

- [12] Shi C F, Zhi J Q, Yao X, Zhang H, Yu Y, Zeng Q S, Li L J, Zhang Y X. How can China achieve the 2030 carbon peak goal—a crossover analysis based on low-carbon economics and deep learning. *Energy*, 2023, 269: 126776.
- [13] Zhang X Y, Chen Y H, Jiang P, Liu L P, Xu X M, Xu Y. Sectoral peak CO₂ emission measurements and a long-term alternative CO₂ mitigation roadmap: a case study of Yunnan, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119171.
- [14] 中华人民共和国公安部. 全国机动车保有量达 4.17 亿辆驾驶人超过 5 亿人. (2024-7-18) [2023-01-11]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-01/11/content_5736278.htm.
- [15] Charoen-Amornkitt P, Nantasaksiri K, Ruangjirakit K, Laoonual Y. Energy consumption and carbon emission assessment of battery swapping systems for electric motorcycle. *Electrochemical Energy Storage and Conversion Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand; Mobility & Vehicle Technology Research Center, King Mo*, 2023, 9(12): e22887.
- [16] 张兰怡, 徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 邱荣祖. 经济高质量发展背景下中国省域物流业碳排放时空分异. *环境科学* 2024, 45(9): 5086-5096.
- [17] 郝瀚, 王贺武, 欧阳明高. 中国乘用车与商用车保有量预测. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, 51: 868-872.
- [18] 戈秋虞, 张兰怡, 邱荣祖, 胡喜生, 张园园. 基于 GDM 法的福建省交通碳排放驱动因素分析. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2022, 51(01): 131-136.
- [19] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0. (2024-7-18) [2024-01-12]. <http://www.sae-china.org/news/society/202010/3957.html>.
- [20] 中国电力企业联合会. 电力行业“十四五”发展规划研究. (2024-7-18) [2020-08-03]. <https://www.cec.org.cn/upload/1/pdf/1609833054935.pdf>.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 绿色交通“十四五”发展规划. (2024-7-18) [2021-10-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01-21/content_5669662.htm.
- [22] 中国社会科学院宏观经济研究中心课题组, 李雪松, 陆旸, 汪红驹, 冯明, 娄峰, 张彬斌, 李双双. 未来 15 年中国经济增长潜力与“十四五”时期经济社会发展主要目标及指标研究. *中国工业经济*, 2020, (4): 5-22.
- [23] 徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡. 粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径. *环境科学*, 2024, 45(5): 3107-3118.
- [24] 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒蕤, 孔祥如, 潘峰, 杨宏. 基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟. *环境科学*, 2022, 43(7): 3386-3395.
- [25] 新华社. 从 7 月开始, 中国将全面实施重型柴油车国六排放标准. (2024-7-18) [2021-05-26]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-05/26/content_5612830.htm.
- [26] 中华人民共和国交通运输部. 2022 年交通运输业发展统计公报. (2024-7-18) [2023-06-16]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
- [27] Zheng B, Tong D, Li M, Liu F, Hong C, Geng G, Li H Y, Li X, Peng L Q, Qi J, Yan L, Zhang Y X, Zhao H Y, Zheng Y X, He K, Zhang Q. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2018, 18(19): 14095-14111.
- [28] Li M, Liu H, Geng G N, Hong C P, Liu F, Song Y, Tong D, Zheng B, Cui H Y, Man H Y, Zhang Q, He K B. Anthropogenic emission inventories in China: a review. *National Science Review*, 2017, 4(6): 834-866.
- [29] Zheng B, Huo H, Zhang Q, Yao Z L, Wang X T, Yang X F, Liu H, He K B. High-resolution mapping of vehicle emissions in China in 2008. *Atmospheric chemistry and physics*, 2015, 15(5): 2519-2519.
- [30] 中华人民共和国生态环境部. 道路机动车排放清单编制技术导则(试行). (2024-7-18) [2014-07-09]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201407/W020140708387895271474.pdf>.
- [31] 葛子豪, 尹航, 徐龙, 杨扬, 吉喆, 黄英. 重型柴油车实际道路氮氧化物和碳排放研究. *中国环境科学*, 2024, 44(2): 646-653.